昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*, February 2006, 49(1):93－99　　ISSN 0454-6296

青杨脊虎天牛的危害与杨树氨基酸组成和含量的相关性

严善春,李金国,温爱亭,程　红,徐　伟,张玉宝

(东北林业大学林学院,哈尔滨　150040)

摘要:**为了研究不同品种杨树上青杨脊虎天牛** *Xylotrechus rusticus* L.**的危害与树木氨基酸组成和含量之间的相关性,利用** HPLC **柱前** AccQ·Tag **衍生法,分析** 35 a **小青杨、**24 a **小青×黑杨、**24 a **小黑杨、**16 a **香杨、**27 a **和** 40 a **小叶杨的韧皮部和木质部中氨基酸的组成及相对含量。在各杨树品系主干** 2.5 m **高处,韧皮部共检测出** 15 **种氨基酸:丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸、半胱氨酸、胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸、苏氨酸和组氨酸;木质部氨基酸种类与韧皮部的相近,区别在于木质部缺少组氨酸,多了缬氨酸。各杨树品系韧皮部同种氨基酸的相对含量差异显著,但与青杨脊虎天牛危害株率无紧密相关性;木质部中同种氨基酸相对含量差异显著,且与青杨脊虎天牛危害株率呈显著正相关。结果提示杨树木质部氨基酸相对含量越高,越利于天牛幼虫的生长发育。小青杨中氨基酸种类齐全、含量均衡,其株被害率高达** 84%**;小黑杨木质部氨基酸种类和相对含量都较贫乏,香杨的氨基酸种类不全,且相对含量不均衡,二者均不受青杨脊虎天牛危害。不同部位株被害率的差异与氨基酸的相对含量无关,可能与青杨脊虎天牛只在老树皮裂缝处产卵的习性有关。**

关键词:**青杨脊虎天牛;韧皮部;木质部;氨基酸;高效液相色谱;抗虫性**

中图分类号:Q968　　文献标识码:A　　文章编号:0454-6296(2006)01-0093-07

Association between the damage of *Xylotrechus rusticus* (Coleoptera: Cerambycidae) and the compositions and contents of amino acids in different poplar strains

YAN Shan-Chun, LI Jin-Guo, WEN Ai-Ting, CHENG Hong, XU Wei, ZHANG Yu-Bao (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The amino acid compositions and relative contents of phloem and xylem in different poplar strains, including 35-yr-old *Populus pseud-simonii*, 24-yr-old *P. pseudo-simonii* × *P. nigra*, 24-yr-old *P. simonii* × *P. nigra*, 16-yr-old *P. koreana*, 27-yr-old *P. simonii* and 40-yr-old *P. simonii*, were detected by high performance liquid chromatography method with AccQ·Tag precolumn derivatization. The relationship between amino acid and the damage of *Xylotrechus rusticus* to poplars was also evaluated. The results showed that fifteen amino acids including Ala, Arg, Asp, Cys, Cyss, Glu, Gly, Ile, Leu, Lys, Phe, Pro, Ser, Thr and His were detected in the phloem at 2.5 m height of stem of tested poplar strains; the kinds of amino acids in the xylem were similar to that in the phloem, except that Val instead of His was present in the xylem. In the phloem, the relative contents of the same amino acids in different poplar strains were remarkably different, but there was no significant correlation between amino acid relative contents and the ratio of damaged trees. In xylem, the relative contents of the same amino acids in different poplar strains were also remarkably different, but there was significant positive correlation between amino acid relative contents and the ratio of damaged trees. The results suggested that the higher the amino acid relative contents in xylem, the better for the growth and development of *Xylotrechus rusticus* larvae. In *P. pseud-simonii*, the 15 kinds of amino acids were all present with their contents in rather balanced level in the xylem, and the rate of damaged trees was as high as 84%.

基金项目:国家十五攻关项目(01-08-03-02);**黑龙江省重大攻关项目**(GB01B203-01)

作者简介:严善春,女,1964 **年** 1 **月生,教授,博导,**E-mail:yanshanchun@126.com;yanshanchun@nefu.edu.cn

收稿日期 Received:2005-04-06;**接受日期** Accepted:2005-12-05

In *P. simonii* × *P. nigra*, only 4 kinds of amino acids were present with their contents in relatively lower level, and in *P. koreana*, 13 kinds of amino acids were present with their relative contents not balanced; the both strains showed high resistance to *Xylotrechus rusticus*. The rate of damaged trees showed no correlation with the relative contents of amino acids in different heights of trees examined, and this may be related to the oviposition habit of *Xylotrechus rusticus* L., which only lays eggs in cracks of old bark.

Key words: *Xylotrechus rusticus*; phloem; xylem; amino acid; high performance liquid chromatography; resistance to insects

杨树是我国重要的造林树种，它既可以作为速生材、又可用于纸浆加工业，但近年来杨树受天牛等蛀干害虫的危害日趋严重(孙丽艳和韩一凡，1995；李会平等，2003)。青杨脊虎天牛 *Xylotrechus rusticus* L.是危害杨树的重要蛀干害虫，它产卵成堆，幼虫危害密集，常造成被害木风折、枯死。近几年，青杨脊虎天牛在黑龙江省的危害面积和危害程度逐年扩大，曾在哈尔滨、齐齐哈尔和绥化等地区大面积发生(蔡建文等，2000；胡春祥等，2004)。传统的化学、生物等防治手段效果均不理想，且成本较高，但目前尚未找到比较理想的防治办法(高瑞桐等，2004；吕文等，2004)。

氨基酸是昆虫生长发育不可缺少的生物活性物质，除参与蛋白质合成外，还具有缓冲调节血液渗透压、参与能量代谢和脂肪酸合成等功能，其含量过低或各种氨基酸的相对比例不均衡，都会影响生物的正常生长发育和繁衍(彩万志等，2001；王荫长，2001)。水稻对寄生物的抗感性与植株内游离氨基酸的种类和数量有关；同时，不同种类害虫对寄主植株内游离氨基酸的要求也不一样，水稻三化螟 *Tryporyza incertulas* 的生长与赖氨酸、精氨酸、亮氨酸和异亮氨酸的含量高低呈正相关，与谷氨酸和苏氨酸的含量呈负相关(于亚军等，1998)。Hamstead 和 Gauld 在 1957 年发现叶片氮素季节性变化同叶螨种群消长密切相关。Leckstein 和 Llewellyn 在 1974 年就注意到氨基酸在豆卫矛蚜 *Aphis fabae* 选择和利用寄主中的作用(Leckstein and Llewellyn，1974)。苹果树不同部位叶片内的氨基酸总量与山楂叶螨 *Tetranychus viennensis* 内禀增长率密切相关，是山楂叶螨在不同部位增长速度不同的内在原因(毛文付和刘春仙，1995)。如果将豆卫矛蚜人工合成饲料中的氨基酸剔除，豆卫矛蚜专食性种群类型的繁殖量下降，而其广食性种群类型的繁殖量不受影响(Tosh *et al*.，2003)。马尾松 *Pinus massoniana* 在人工模拟酸雨条件下，氨基酸含量增加，增强了对次期性害虫的适口性，易招致次期害虫的入侵(姬兰柱等，1994)。杨树氨基酸含量与杨树的抗性及光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis*、桑天牛 *Apriona germari* 的危害程度有关(闫晔辉等，1996；李淑玲等，2001)。寄主体内氨基酸、蛋白质和可溶性糖的含量是决定锈色粒肩天牛 *Apriona swainsoni* 对寄主选择的倾向程度和危害程度的关键(刘桂华和唐燕平，2002)，而云斑天牛 *Batocera horsfieldi* 对杨树树干的危害与杨树中所含的氨基酸等营养物质并无关系(孙丽艳和韩一凡，1995)。由此可见，不同种类的昆虫对寄主植物氨基酸含量的反应存在很大差异。

在调查青杨脊虎天牛的危害状况时，发现不同杨树品系受害程度差异很大。青杨脊虎天牛的危害程度与杨树氨基酸的组成与含量是否相关，国内外尚未见报道。本文通过测定不同品系杨树的木质部和韧皮部中氨基酸组成及相对含量，揭示出青杨脊虎天牛的危害与杨树中氨基酸组成及其含量的关系，探索了杨树的抗虫机理，以期为选育、营造抗虫品系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

黑龙江省大庆市红旗林场地处沙丘平原，各杨树品系生长的立地条件相似。5 月下旬，于红旗林场采集 35 a 小青杨 *Populus pseudo-simonii*、24 a 小青×黑杨 *P. pseudo-simonii* × *P. nigra*、24 a 小黑杨 *P. simonii* × *P. nigra*、16 a 香杨 *P. koreana*、27 a 和 40 a 小叶杨 *P. simonii* 的韧皮部和木质部样品。对上述每个品系和林龄的杨树各选择 3 株样树，根据青杨脊虎天牛成虫的产卵习性，对 27 a 小叶杨分别在主干 4.0 m、2.5 m 和 1.0 m 3 个高度进行采样，对小青杨、小青×黑杨、小黑杨、香杨和 40 a 小叶杨则只在主干 2.5 m 高度处采样。青杨脊虎天牛初孵幼虫群栖危害，将粪屑排出产卵处树皮裂缝，一周后，群栖幼虫排泄物不再排出树皮外，而是堆积在树皮下的坑道内。随着树皮下排泄物的不断增加，最终导致

树皮与木质部完全分离，使树皮开裂、坏死。根据青杨脊虎天牛的危害状，对 27 a 小叶杨随机抽取 100 株树，调查主干 4.0 m、2.5 m 和 1.0 m 3 个高度的被害株率。对上述其他品系和林龄的杨树各随机抽取 50 株树，调查各不同杨树品系的被害株率。

1.2　氨基酸的提取

1.2.1　除去试样中的粗脂肪：将采集的样品烘干、粉碎，过 60 目分样筛，再烘干，之后贮存在干燥器中备用。称取 3 g 烘干至恒重的试样，用 15 cm×15 cm 滤纸紧密包裹，放入索氏抽提装置中，在 45℃水浴锅中用乙醚抽提 14 h，除去粗脂肪。

1.2.2　试样的水解：将已除去脂肪的试样包打开，精确称取 30 mg 试样加入到洁净的细颈试管底部，再向该试管中加入 10 mL 配制好的 6 mol/L 盐酸溶液，静置 10 min。用真空泵将装有试样的试管抽成真空，待溶液中不再有气泡逸出后，用酒精喷灯封闭细颈处。将封闭好的试管置于 110℃烘箱内，水解 24 h。

水解后取出试管，冷却至室温，小心打破试管，过滤管内溶液至 25 mL 容量瓶中，用 2 次重蒸水定容。抽取 5 mL 定容好的滤液，用 0.45 μm 滤膜过滤，再准确抽取 2 mL 滤液至 10 mL 小烧杯中，以 100℃水浴蒸干，加入 2 mL 重蒸水，再次蒸干，重复 3 次，除净盐酸。将蒸干后的小烧杯用硫酸纸封口，放入 4℃的冰箱中待用。

1.3　氨基酸的测定

1.3.1　试样的衍生：向盛有水解产物的小烧杯中加入 80 μL 0.02 mol/L 盐酸溶液，涡旋混合 10 s，从中抽取 20 μL，加入到 6 mm×50 mm 衍生化试管中，再加入 60 μL AccQ·Fluor 硼酸缓冲液，涡旋混合。向混合好的衍生化试管中加入 20 μL AccQ·Fluor 衍生试剂，立即涡旋混合数秒钟，放置 1 min。衍生化试管用封口膜封闭，放在 55℃的烘箱中加热 10 min。之后取出衍生化试管，将衍生好的试样加入到微量进样瓶中，盖好瓶盖即可上机检测。

1.3.2　氨基酸 HPLC 的测定：利用 Waters2695 高效液相色谱仪与 Waters2996 型二极管距阵检测器（美国 Waters 公司制造）测定样品中的氨基酸组成及其相对含量，色谱柱采用 AccQ·Tag 方法专用的 4 μm 高效 Nova-PakTM C18 柱。检测时色谱柱放在柱温箱中。

在检测氨基酸前配好流动相 A、B、C，其中 A 液为 1/10（V/V）的 AccQ·Tag A 溶液（WAT052890）与水配制而成，B 液为纯乙腈，C 液为超纯水。所有溶剂在使用前都使用溶剂过滤装置过滤，并在超声波清洗器中超声脱气 1 min，检测时仍保持用氦气脱气。检测色谱条件为 AccQ·Tag 法要求的色谱条件，柱温为 37℃，紫外检测波长为 248 nm，按系统要求设置梯度，单次运行时间为 45 min。

1.4　数据处理

根据色谱图的数据报告，利用 SPSS 统计软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　青杨脊虎天牛对不同杨树品系的危害

青杨脊虎天牛对杨树不同品系之间的危害情况差异较大，35 a 小青杨的受害程度最严重，被害株率高达 84%；小叶杨受害也比较严重，40 a 的被害株率为 56%，27 a 的被害株率为 42%；24 a 小青×黑杨受害较轻，被害株率仅为 8%；而 24 a 小黑杨和 16 a 香杨则没有受害。这说明不同品系、不同林龄的杨树对青杨脊虎天牛的感虫程度不同。青杨脊虎天牛对 27 a 小叶杨 4.0 m、2.5 m 和 1.0 m 高处主干的危害株率分别为 8%、42%和 32%，对主干下部的危害比上部严重。

2.2　韧皮部氨基酸组成及相对含量

在 6 个杨树品系主干 2.5 m 高处的韧皮部中，共测出 15 种氨基酸，即：丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸、半胱氨酸、胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸、苏氨酸和组氨酸。各杨树品系韧皮部同种氨基酸的相对含量有一定的差异（表 1）。其中，16 a 香杨韧皮部中各种氨基酸的相对含量普遍高于其他品系。小青×黑杨，除了胱氨酸和赖氨酸之外，其他氨基酸的相对含量在这些品系中都是最低的。40 a 小叶杨每种氨基酸的相对含量均高于小黑杨，但与 27 a 小叶杨各种氨基酸的相对含量基本接近。

经 F 差异显著性分析可知，各杨树品系韧皮部中精氨酸和甘氨酸相对含量的差异极显著（$F_{0.01} = 4.03$），丙氨酸、半胱氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸相对含量的差异显著（$F_{0.05} = 2.66$）（表 1）。

除个别氨基酸外，不同品系韧皮部氨基酸相对含量的总趋势为 16 a 香杨 > 40 a 小叶杨 ≈ 27 a 小叶杨 > 24 a 小黑杨 > 35 a 小青杨 > 24 a 小青×黑杨。各杨树品系感虫程度的总趋势为 35 a 小青杨 > 40 a 小叶杨 > 27 a 小叶杨 > 24 a 小青×黑杨 > 16 a 香杨

表 1 不同杨树品系韧皮部中各种氨基酸的相对含量

Table 1 Relative contents of amino acids in the phloem of different poplar strains

氨基酸 Amino acids	杨树品系 Poplar strains					
	香杨 *Populus koreana* (16-yr-old)	**小黑杨** *P. simonii* × *P. nigra* (24-yr-old)	**小青杨** *P. pseudo-simonii* (35-yr-old)	**小青×黑杨** *P. pseudo-simonii* × *P. nigra* (24-yr-old)	**小叶杨** *P. simonii* (40-yr-old)	**小叶杨** *P. simonii* (27-yr-old)
丙氨酸 Ala	2.0858 ± 0.4383 aA	1.0325 ± 0.2402 abA	0.8266 ± 0.3890 bA	0.7311 ± 0.4134 bA	1.1377 ± 0.1955 abA	1.0196 ± 0.2333 abA
精氨酸 Arg	3.2411 ± 0.8281 aA	1.1517 ± 0.2364 bB	1.1062 ± 0.3972 bB	0.8555 ± 0.3376 bB	1.3118 ± 0.2377 bB	1.1439 ± 0.2309 bB
天冬氨酸 Asp	5.6170 ± 1.3247 a	2.9630 ± 0.6277 a	2.3027 ± 1.1149 a	2.2021 ± 1.1190 a	3.4130 ± 0.5633 a	3.1302 ± 0.6693 a
半胱氨酸 Cys	1.4612 ± 0.2933 aA	0.7276 ± 0.2041 abA	0.5782 ± 0.2861 bA	0.5371 ± 0.2295 bA	0.8201 ± 0.1459 abA	0.7337 ± 0.1257 abA
胱氨酸 Cyss	2.7874 ± 0.7129 a	0.7570 ± 0.5354 a	0.7716 ± 0.6094 a	1.4217 ± 1.2467 a	1.2061 ± 0.2412 a	1.0640 ± 0.4598 a
谷氨酸 Glu	2.9240 ± 0.5187 a	2.5540 ± 0.5808 a	2.1277 ± 1.0374 a	1.9021 ± 1.0307 a	2.8874 ± 0.4952 a	2.5960 ± 0.5558 a
甘氨酸 Gly	1.5656 ± 0.2718 aA	0.7052 ± 0.2094 bB	0.5822 ± 0.2718 bAB	0.4713 ± 0.2446 abAB	0.8164 ± 0.1880 bAB	0.7198 ± 0.1804 bAB
组氨酸 His	2.3851 ± 0.5900 a	0.7085 ± 0.5038 a	0.3948 ± 0.5583 a	0.3663 ± 0.5181 a	0.6999 ± 0.5203 a	1.1464 ± 0.4913 a
异亮氨酸 Ile	2.7867 ± 0.5844 aA	1.3372 ± 0.3728 abA	1.0764 ± 0.5311 bA	0.9262 ± 0.4674 bA	1.5158 ± 0.2850 abA	1.3489 ± 0.2522 abA
亮氨酸 Leu	2.7474 ± 0.5208 aA	1.4087 ± 0.3762 abA	1.0997 ± 0.5562 bA	0.9787 ± 0.4866 bA	1.5151 ± 0.3101 abA	1.4232 ± 0.2254 abA
赖氨酸 Lys	7.5003 ± 2.1690 aA	2.9798 ± 0.8752 abA	2.6257 ± 1.5040 bA	2.7337 ± 2.1613 abA	4.0344 ± 0.6584 abA	2.7752 ± 0.6286 abA
苯丙氨酸 Phe	2.1842 ± 0.5656 aA	0.8893 ± 0.2923 bA	0.6305 ± 0.4803 bA	0.6250 ± 0.2345 bA	1.1086 ± 0.1557 abA	0.9939 ± 0.2531 abA
脯氨酸 Pro	8.6988 ± 5.3321 a	6.0457 ± 1.5260 a	4.6596 ± 2.3337 a	4.1307 ± 2.1921 a	6.2161 ± 1.2207 a	5.8173 ± 1.1116 a
丝氨酸 Ser	2.6203 ± 0.3725 aA	1.2541 ± 0.3657 bA	0.9984 ± 0.4712 bA	0.8816 ± 0.4988 bA	1.4103 ± 0.3098 abA	1.2564 ± 0.3285 bA
苏氨酸 Thr	1.7868 ± 0.2972 aA	0.8868 ± 0.2130 bA	0.7094 ± 0.3121 bA	0.5996 ± 0.3020 bA	0.9467 ± 0.1925 abA	0.8729 ± 0.1892 bA

注：表中数据是平均值 ± 标准差，同行内数据后不同字母表示差异达显著水平，q 法，小写字母表示 $P < 0.05$，大写字母表示 $P < 0.01$。下同。
Notes: The data in the table are mean ± *SD*. Values within the same row followed by different letters are significantly different (capital letters, $P < 0.01$; small letters, $P < 0.05$; q-multiple range test). The same below.

= 24 a 小黑杨。从二者的总趋势看，韧皮部中氨基酸相对含量与青杨脊虎天牛对杨树不同品系危害程度之间无一定的规律性。其原因可能与青杨脊虎天牛的生物学特性有关，其幼虫仅在孵化的前几天在皮下取食，之后蛀入木质部，因而韧皮部的化学特性对其影响很小。

2.3 木质部氨基酸组成及相对含量

在各杨树品系主干 2.5 m 高处的木质部中，共检测出 15 种氨基酸，氨基酸种类与韧皮部的相近，不同之处是木质部没有组氨酸，却多了缬氨酸，包括丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸、半胱氨酸、胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸、苏氨酸、缬氨酸。各杨树品系的氨基酸在种类和相对含量上都有一定的差异。其中，小黑杨只检测出 4 种氨基酸，分别为丙氨酸、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸；小青×黑杨检测出 12 种氨基酸，缺胱氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸；香杨检测出 13 种氨基酸，缺胱氨酸和苯丙氨酸；40 a 小叶杨和 27 a 小叶杨分别检测出 14 种氨基酸，前者缺缬氨酸，后者缺胱氨酸；小青杨检测出 15 种氨基酸，而且各种氨基酸的相对含量比较均衡，没有过高或过低的现象(表 2)。经 F 差异显著性检验可知，除胱氨酸、丝氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸外，其他氨基酸的相对含量差异性显著，其中，半胱氨酸、甘氨酸、异亮氨酸和亮氨酸相对含量差异显著($F_{0.05} = 2.66$)，丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、赖氨酸、脯氨酸和苏氨酸相对含量的差异极显著($F_{0.01} = 4.03$)(表 2)。

青杨脊虎天牛幼虫主要在木质部中取食生活，木质部的营养状况对其影响较大。小青杨中氨基酸种类齐全、含量均衡，其半胱氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸和精氨酸的相对含量高于其他品系，有利于青杨脊虎天牛幼虫的生长发育，从其株被害率高达 84% 可以说明这一点。40 a 小叶杨木质部中有 14 种氨基酸，其甘氨酸、丙氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、赖氨酸、脯氨酸的相对含量也均高于其他品系，其被害株率为 56%。小青×黑杨木质部氨基酸种类不全，且其各种氨基酸的相对含量都较低，不利于天牛幼虫的正常生长发育，株被害率较低，仅为 8%。小黑杨和香杨的株被害率均为 0，前者木质部氨基酸种类和相对含量都较贫乏，后者氨基酸种类不全，且其各种氨基酸的相对含量不均衡，影响天牛幼虫的正常生长发育。

上述分析说明，氨基酸种类齐全、相对含量均衡时，利于青杨脊虎天牛的生长发育，加重了其对杨树的危害；氨基酸种类少、相对含量不均衡或含量较低时，不利于青杨脊虎天牛的生长发育，可抑制其对杨树的危害。

表 2　不同杨树品系木质部各种氨基酸的相对含量

Table 2　Relative contents of amino acids in the xylem of different poplar strains

氨基酸 Amino acids	杨树品系 Poplar strains					
	香杨 *Populus koreana* (16-yr-old)	小黑杨 *P*. *simonii* × *P*. *nigra* (24-yr-old)	小青杨 *P*. *pseudo-simonii* (35-yr-old)	小青×黑杨 *P*. *pseudo-simonii* × *P*. *nigra* (24-yr-old)	小叶杨 *P*. *simonii* (40-yr-old)	小叶杨 *P*. *simonii* (27-yr-old)
丙氨酸 Ala	0.3579 ± 0.0990 bcAB	0.1752 ± 0.0395 cB	0.6491 ± 0.1097abA	0.4489 ± 0.0244abcAB	0.7024 ± 0.1745aA	0.4014 ± 0.0415abcAB
精氨酸 Arg	0.1974 ± 0.2792abcAB	0 cB	1.0157 ± 0.2871aA	0.4713 ± 0.0468abcAB	0.8091 ± 0.1880abAB	0.1752 ± 0.2477bcAB
天冬氨酸 Asp	0.9916 ± 0.1569abA	0 cB	1.1922 ± 0.1171abA	1.0064 ± 0.0606abA	1.6305 ± 0.3677aA	0.9192 ± 0.2583bA
半胱氨酸 Cys	0.1972 ± 0.0239 abA	0 bA	0.3623 ± 0.1374 aA	0.1763 ± 0.0210 abA	0.3386 ± 0.1513 aA	0.0949 ± 0.0697abA
胱氨酸 Cyss	0 a	0 a	0.7112 ± 1.0058 a	0 a	0.3951 ± 0.5588 a	0 a
谷氨酸 Glu	0.8607 ± 0.0873aAB	0 bB	1.2437 ± 0.1318aA	0.8313 ± 0.0060aAB	1.5138 ± 0.4927aA	0.7945 ± 0.1445aB
甘氨酸 Gly	0.2177 ± 0.0506abA	0.0626 ± 0.0885bA	0.4921 ± 0.1646aA	0.2973 ± 0.0156abA	0.5451 ± 0.1935aA	0.2648 ± 0.0369abA
异亮氨酸 Ile	0.3505 ± 0.0336abA	0bA	0.7411 ± 0.3519aA	0.3367 ± 0.0179abA	0.6260 ± 0.2729abA	0.3199 ± 0.1056abA
亮氨酸 Leu	0.3687 ± 0.0286abA	0bA	0.7150 ± 0.3232aA	0.1151 ± 0.1628abA	0.6413 ± 0.2609abA	0.2893 ± 0.2142abA
赖氨酸 Lys	0.8032 ± 0.0537abAB	0bB	1.0412 ± 0.2851abAB	0.8195 ± 0.0682abAB	1.8330 ± 0.8407aA	0.8658 ± 0.0579abAB
苯丙氨酸 Phe	0 a	0 a	0.7702 ± 0.5403 a	0 a	0.3598 ± 0.2706 a	0.1156 ± 0.1635 a
脯氨酸 Pro	1.3624 ± 0.4100 abAB	0bB	1.4363 ± 0.7578abAB	1.8216 ± 0.2163abAB	3.0113 ± 1.2387aA	1.4993 ± 0.1916abAB
丝氨酸 Ser	0.5833 ± 0.1273 a	0.3024 ± 0.2139 a	0.8105 ± 0.1167 a	0.5301 ± 0.0046 a	0.8273 ± 0.0801 a	0.4887 ± 0.0614 a
苏氨酸 Thr	0.3203 ± 0.0633 bcB	0.2018 ± 0.0201 cB	0.7169 ± 0.1885 aA	0.3388 ± 0.0146 bcAB	0.5460 ± 0.0610 abAB	0.3263 ± 0.0456 bcB
缬氨酸 Val	0.2441 ± 0.3451 a	0 a	0.2416 ± 0.3417 a	0 a	0 a	0.4432 ± 0.6268 a

2.4　氨基酸的相对含量与杨树被害株率的相关性分析

根据上面差异显著性分析结果，对相对含量差异显著的 14 种氨基酸与杨树被害株率进行相关分析，结果见表 3。

由表 3 可见，韧皮部氨基酸相对含量与青杨脊虎天牛的危害无紧密相关性，这与 2.2 的分析结果是一致的。在杨树不同品系的木质部中，11 种氨基酸的相对含量与杨树被害株率有紧密正相关，其中，9 种即丙氨酸、精氨酸、半胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸的相对含量与被害株率极显著相关；2 种即赖氨酸和天冬氨酸的相对含量与被害株率显著相关；胱氨酸、脯氨酸和丝氨酸的含量与被害株率没有相关性。

表 3　不同杨树品系的氨基酸相对含量与被害株率的相关性

Table 3　The correlation between relative contents of amino acids and the rate of damaged trees in different poplar strains

氨基酸 Amino acids	皮尔逊相关性 Pearson correlation		二尾显著性概率 Sig. (2-tailed)	
	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem
丙氨酸 Ala	−0.219	0.603**	0.303	0.002
精氨酸 Arg	−0.256	0.664**	0.226	0.000
天冬氨酸 Asp	−0.182	0.477*	0.394	0.018
半胱氨酸 Cys	−0.215	0.517**	0.313	0.010
胱氨酸 Cyss	−0.284	0.402	0.178	0.051
谷氨酸 Glu	−0.211	0.554**	0.322	0.005
甘氨酸 Gly	−0.222	0.551**	0.297	0.005
异亮氨酸 Ile	−0.208	0.618**	0.330	0.001
亮氨酸 Leu	−0.224	0.598**	0.293	0.002
赖氨酸 Lys	−0.197	0.464*	0.357	0.002
苯丙氨酸 Phe	−0.121	0.685**	0.582	0.000
脯氨酸 Pro	−0.121	0.382	0.574	0.066
丝氨酸 Ser	−0.233	0.282	0.272	0.182
苏氨酸 Thr	−0.241	0.718**	0.257	0.000

** 相关性显著水平为 99%（二尾检验）Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). * 相关性的显著水平为 95%（二尾检验）Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

在木质部与被害株率显著相关的 11 种氨基酸中，精氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸和赖氨酸是昆虫的必需氨基酸（王荫长，2001）。青杨脊虎天牛只有从木质部不断摄取这些必需氨基酸才能维持正常的生长发育。非必需氨基酸虽然可以在体内合成，但需要大量的氨基为模板，若不从体外摄入非必需氨基酸，便要靠分解体内必需氨基酸来合成，进而影响生长发育。

上述分析说明，木质部中丙氨酸、精氨酸、半胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、赖氨酸和天冬氨酸的含量越高，越易引起青杨脊虎天牛的危害。

2.5　同一杨树品系不同部位氨基酸相对含量与青杨脊虎天牛危害关系

在 27 a 小叶杨主干 4.0 m、2.5 m 和 1.0 m 3 个高度的韧皮部和木质部共检测出 17 种氨基酸，木质部除在 1.0 m 多了胱氨酸、组氨酸和蛋氨酸外，其他 14 种氨基酸与各杨树品系 2.5 m 高处的木质部中检测出的氨基酸相同。韧皮部 3 个高度处均无蛋氨酸，2.5 m 处无缬氨酸，但 4.0 m 和 1.0 m 处有缬氨酸（见表 4）。

表 4　27 a 小叶杨主干不同高度氨基酸相对含量

Table 4　Relative contents of amino acids at different heights of *P. simonii* (27 a) stem

氨基酸 Amino acids	高度 Height (m)					
	4.0		2.5		1.0	
	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem
丙氨酸 Ala	1.4829 ± 0.4029	0.4222 ± 0.1463	1.0196 ± 0.2333	0.4014 ± 0.0415	0.9513 ± 0.4402	0.7256 ± 0.2341
精氨酸 Arg	1.9414 ± 0.7041	0.4384 ± 0.3131	1.1439 ± 0.2309	0.1752 ± 0.2477	1.1720 ± 0.3177	0.8284 ± 0.2318
天冬氨酸 Asp	4.1891 ± 1.0056	0.6958 ± 0.5216	3.1302 ± 0.6693	0.9192 ± 0.2583	3.1013 ± 1.4009	1.6364 ± 0.2636
半胱氨酸 Cys	1.0588 ± 0.3100	0.2073 ± 0.0756	0.7337 ± 0.1257	0.0949 ± 0.0697	0.6980 ± 0.2929	0.0909 ± 0.1285
胱氨酸 Cyss	1.8956 ± 0.3525	0	1.0640 ± 0.4598	0	1.0333 ± 0.3730	0.4299 ± 0.6079
谷氨酸 Glu	3.7976 ± 1.0519	0.6400 ± 0.4605	2.5960 ± 0.5558	0.7945 ± 0.1445	2.4914 ± 1.1063	1.4656 ± 0.3048
甘氨酸 Gly	1.0338 ± 0.3143	0.2978 ± 0.1124	0.7198 ± 0.1804	0.2648 ± 0.0369	0.6735 ± 0.2580	0.6139 ± 0.3002
组氨酸 His	1.1464 ± 0.8774	0	0.3474 ± 0.4913	0	0.3448 ± 0.4876	0.5956 ± 0.8423
异亮氨酸 Ile	1.9968 ± 0.6009	0.3126 ± 0.2212	1.3489 ± 0.2522	0.3199 ± 0.1056	1.2819 ± 0.5270	0.4285 ± 0.0483
亮氨酸 Leu	1.9472 ± 0.6190	0.2981 ± 0.2108	1.4232 ± 0.2254	0.2893 ± 0.2142	1.3030 ± 0.5234	0.7630 ± 0.2157
赖氨酸 Lys	5.4342 ± 1.6218	0.5815 ± 0.4137	2.7752 ± 0.6286	0.8658 ± 0.0579	2.8815 ± 1.2681	1.3693 ± 0.3512
蛋氨酸 Met	0	0	0	0	0	2.7413 ± 3.8767
苯丙氨酸 Phe	1.3784 ± 0.4090	0.2762 ± 0.1970	0.9939 ± 0.2531	0.1156 ± 0.1635	0.9645 ± 0.2605	0.4304 ± 0.0305
脯氨酸 Pro	5.4169 ± 3.4432	1.5927 ± 0.5757	5.8173 ± 1.1116	1.4993 ± 0.1916	5.4745 ± 2.2218	2.2259 ± 0.1647
丝氨酸 Ser	1.7807 ± 0.5008	0.5833 ± 0.2130	1.2564 ± 0.3285	0.4887 ± 0.0614	1.1636 ± 0.5308	1.4731 ± 1.1457
苏氨酸 Thr	1.2144 ± 0.3316	0.3938 ± 0.1241	0.8729 ± 0.1892	0.3263 ± 0.0456	0.8160 ± 0.3243	0.6161 ± 0.1701
缬氨酸 Val	0.3612 ± 0.5108	0	0	0.4432 ± 0.6268	0.2402 ± 0.3396	1.4435 ± 1.0484

由表 4 可见，在韧皮部，4.0 m 高处的氨基酸相对含量较 1.0 m 和 2.5 m 处的高，1.0 m 和 2.5 m 的氨基酸相对含量相近。在木质部，1.0 m 高处各种氨基酸的相对含量均高于其他两个高度的氨基酸相对含量，在 4.0 m 和 2.5 m 高处的氨基酸的相对含量基本相近。但差异显著性分析结果表明，上、中、下 3 个高度韧皮部的各种氨基酸含量无显著性差异，3 个高度木质部的各种氨基酸含量亦无显著性差异（$F_{0.05} = 5.14$），这说明 27 a 小叶杨不同高度氨基酸含量的变化对青杨脊虎天牛危害株率的影响没有统计学意义。

3　讨论

青杨脊虎天牛大部分时间在木质部生活，木质部氨基酸种类齐全，含量均衡，利于天牛幼虫的生长发育，从而使杨树受害加重。本研究结果证实了这一点。在 27 a 和 40 a 小叶杨、24 a 小青 × 黑杨、35 a 小青杨、24 a 小黑杨和 16 a 香杨木质部中氨基酸的相对含量与青杨脊虎天牛的危害株率呈现正相关，其中丙氨酸、精氨酸、半胱氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸的相对含量与被害株率极显著相关；赖氨酸和天冬氨酸的相对含量与被害株率显著相关。小青杨木质部中含有 15 种氨基酸，氨基酸种类齐全，含量均衡，有利于青杨脊虎天牛幼虫的生长发育，其被害株率高达 84%。小黑杨和香杨木质部氨基酸种类不全，前者只检测出 4 种氨基酸，后者检测出 13 种氨基酸，含量也不均衡，不利于青杨脊虎天牛幼虫的生长发育，青杨脊虎天牛的危害株率均为 0。

韧皮部的化学特征对于蛀干害虫来说，主要是影响昆虫对寄主的选择和繁殖。已有的研究表明，韧皮部的氨基酸含量与青杨脊虎天牛的危害株率无紧密相关性，可能是因为其产卵选择与韧皮部的次生代谢物单宁和酚类物质等有关（徐福元等，1998），与氨基酸组成和含量无关。

27 a 小叶杨韧皮部和木质部上、中、下 3 个高度中的氨基酸相对含量差异不显著，青杨脊虎天牛在不同部位危害株率的差异，可能与其产卵习性有关。青杨脊虎天牛产卵前不做刻槽，而是直接把产卵器插入老树皮的夹缝或裂缝里，几乎不在光滑的嫩枝皮上产卵（蔡建文等，2000），因而上部嫩梢处被害率较低。

参考文献（References）

Cai JW, Gu M, Sun YF, Wang XZ, 2000. The ecological characteristics of *Xylotrechus rusticus*. *Forestry Science & Technology*, 25(2): 29. [蔡建文，谷镅，孙玉峰，王喜志，2000. 青杨虎天牛的生态学特性. 林业科技，25(2): 29]

Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2001. General Entomology. Beijing: China Agricultural University Press. 127. [彩万

志，庞雄飞，花保祯，梁广文，宋敦伦，2001. 普通昆虫学. 北京：中国农业大学出版社. 127]

Gao RT，Chen HZ，Lin SR，Nie Q，2004. Development of research on poplars stem-boring insects. *China Forestry Science and Technology*，18(1)：6－8. [高瑞桐，陈合志，林淑荣，聂谦，2004. 杨树蛀干害虫研究进展. 林业科技开发，18(1)：6－8]

Hamstead EO，Gauld E，1957. Relation of mite population to seasonal leaf nitrogen levels in apple orchard. *J. Econ. Entomol.*，50(1)：109－110.

Hu CX，Huang YH，Li CJ，Sun JH，2004. Larval spatial distribution pattern of *Xylotrechus rusticus*. *Entomological Knowledge*，41(3)：241－244. [胡春祥，黄咏槐，李成军，孙江华，2004. 青杨脊虎天牛幼虫空间分布格局. 昆虫知识，41(3)：241－244]

Ji LZ，Yang JK，Chen CY，1994. The relationship between nutrient variance in the plant and the occurrence of insect pests in the stress of simulated acid rain. *Environmental Pollution & Control*，16(2)：2－4. [姬兰柱，杨金宽，陈楚莹，1994. 模拟酸雨条件下树木氨基酸变化与害虫的发生关系. 环境污染与防治，16(2)：2－4]

Leckstein PM，Llewellyn M，1974. The role of amino acids in diet intake and selection and the utilisation of dipeptides by *Aphis fabae*. *Journal of Insect Physiology*，20：877－885.

Li HP，Wang ZG，Yang MS，Zhang YG，Huang DZ，Zhang SH，2003. The relation between tannin and phenol constituents and resistance to *Anoplophora glabripennis* of various poplar tree species. *J. Hebei Agri. Univer.*，26(1)：36－39. [李会平，王志刚，杨敏生，张彦广，黄大庄，张世红，2003. 杨树单宁与酚类物质种类及含量与光肩星天牛危害之间关系的研究. 河北农业大学学报，26(1)：36－39]

Li SL，Liu MQ，Li JD，Sang YQ，Liu JY，Zhang QJ，2001. Study on the relationship between bark inclusion in the clones of *Populus tomentosa* and the resistance to *Apriona germari*. *J. Henan Agri. Univer.*，35(3)：216－220. [李淑玲，刘美青，李继东，桑玉强，刘建业，张秋娟，2001. 毛白杨无性系树皮有机物质含量与抗性关系的研究. 河南农业大学学报，35(3)：216－220]

Liu GH，Tang YP，2002. The relationships between *Apriona swainsoni* and its host trees. *Scientia Silvae Sincae*，38(3)：106－113. [刘桂华，唐燕平，2002. 锈色粒肩天牛与寄主树种关系的初步研究. 林业科学，38(3)：106－113]

Lu W，Hu M，Hu JJ，Yao XR，2004. Discussion on severity and control of Asian longhorned beetle (ALB) of protection forest program. *Protection Forest Science and Technology*，(1)：39－40，77. [吕文，胡莽，胡建军，姚向荣，2004. 三北防护林杨树天牛的危害与防治. 防护林科技，(1)：39－40，77]

Mao WF，Liu CX，1995. Correlation of different part leaves and their amino acid amount in apple tree with population density of hawthorn spider mite. *J. Huazhong Agri. Univer.*，14(2)：141－142. [毛文付，刘春仙，1995. 苹果树叶片及其氨基酸含量对山楂叶螨种群数量的影响. 华中农业大学学报，14(2)：141－142]

Sun LY，Han YF，1995. A preliminary study on chemical substances resistant to *Bactocera horsfieldi* on *Populas deltoides*. *Scientia Silvae Sinicae*，31(4)：338－345. [孙丽艳，韩一凡，1995. 对云斑天牛有不同抗性的杨树品种中化学物质的分析. 林业科学，31(4)：338－345]

Tosh CR，Powell G，Holmes ND，Hardie J，2003. Reproductive response of generalist and specialist aphid morphs with the same genotype to plant secondary compounds and amino acids. *Journal of Insect Physiology*，49(12)：1 173－1 182.

Wang YC，2001. Biochemistry of Insect. Beijing：China Agriculture Press. 60，92－96. [王荫长，2001. 昆虫生物化学. 北京：中国农业出版社. 60，92－96]

Xu FY，Ge MH，Zhao ZD，Zhu KG，1998. Studies on the relationship of amino acid content of different masson pine provenances and their resistance to pine wood nematode (PWN). *Forest Research*，11(3)：313－318. [徐福元，葛明宏，赵振东，朱克恭，1998. 马尾松不同种源氨基酸含量与抗松材线虫病的关系. 林业科学研究，11(3)：313－318]

Yan YH，Huang DZ，Yan JJ，1996. A preliminary study on the relationship between amino acid composition in wood and susceptibility to *Anoplophora glabripennis* for several species in Salicaceae. *Journal of Hebei Forestry College*，11(3－4)：259－262. [闫晔辉，黄大庄，闫浚杰，1996. 树木氨基酸组成与光肩星天牛危害程度关系的初步研究. 河北林学院学报，11(3－4)：259－262]

Yu YJ，Fang JC，Gao Y，1998. The relationship of amino acid in rice plants with the larvae development of *Tryporyza incertulas* (Walker). *Journal of Jiangsu Agricultural Science*，(4)：36－37. [于亚君，方继朝，高渊，1998. 氨基酸与水稻三化螟幼虫生长关系初探. 江苏农业科学，(4)：36－37]

（责任编辑：吴明宇）